

풍력-태양광 복합 가로등 구조특성 연구

전현준 · 장춘만[†]

한국건설기술연구원 환경연구실

Structural Characteristics for the Hybrid Street-Lamp of a Small Wind Turbine and Photovoltaic Power System

HYUN-JUN JEON, CHOON-MAN JANG[†]

Korea Institute of Construction Technology, Environmental Engineering Research Division
Daehwa-dong Ilsanseo-gu, Goyang-Si, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

Abstract >> In the present study, structure analysis has been performed to understand the deflection and stress distribution for a hybrid street-lamp having a vertical-axis wind turbine and a photovoltaic panel. Modal analysis is also evaluated to avoid resonance generated by synchronism between a turbine and a lamppost. To analyze deflection, stress and frequency, general analysis code(ANSYS-Mechanical 13) is employed in the present work. Throughout structure analysis in the hybrid street-lamp, maximum stress is observed at the connecting position between a turbine blade and a blade supporter. Campbell diagram which is combined the natural frequency of turbine blades and blade passing frequency is presented to analyze a system resonance. It is found that the resonance of the system having a rotating turbine blade and a lamppost can avoid by the optimal selection of geometric parameters of a wind turbine.

Key words : Vertical-axis wind turbine(수직축 풍력발전기), Computational structural dynamics(전산구조동역학), Natural frequency(고유진동수), Blade passing frequency(익 통과 주파수), Campbell diagram(캠벨선도)

1. 서 론

최근 들어 화석에너지의 고갈로 인한 대체에너지 개발과 심각한 환경오염 문제로 인한 무공해 청정에너지 개발이 필요한 필요하며, 풍력, 태양광 등 신재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다^{1),2)}. 이 중에서 풍력발전은 에너지원이 자연계의 무한한 바람이므로 발전에 따른 대기오염이나 수질오염 등 환경에 대한 영향이 극히 적으며 온실가스 등을 배출하지 않는

청정에너지이다. 1 MW 이상의 대형풍력발전기와는 다르게 200 W~1 kW급의 소형풍력발전기는 저소음 특성으로 에너지 수요처 가까이에 설치하여 사용할 수 있다는 장점이 있다. 소형풍력발전기의 경우 제한된 바람으로 인하여 안정적인 에너지 공급이 어렵기에 태양광 발전기와의 하이브리드 시스템으로 많이 이용되고 있다. 이러한 소형풍력-태양광 하이브리드 발전시스템은 축전시스템과 결합하여 안정적으로 에너지를 공급할 수 있다.

소형풍력-태양광 복합가로등은 기류속도 변화에 따른 풍력터빈의 로터 회전수가 변하며, 고속기류에 서는 터빈 로터와 설치 구조물과의 공진에 의한 혼

[†] Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

[접수일 : 2013.12.01 수정일 : 2013.12.12 게재확정일 : 2013.12.31]

Copyright © 2013 KHNES

들림이 발생된다. 즉 블레이드는 바람에 의한 다양한 하중조건하에서 설계수명 동안 운영될 수 있도록 설계되어야 한다⁴⁾. 회전체와 구조물의 공진특성을 평가하기 위하여 차량엔진 진동⁵⁾, 풍력시스템^{6,7)} 등에 캠벨선도(Campbell diagram)가 이용되고 있다.

본 연구에서는 소형풍력터빈-태양광 발전기 하이브리드 가로등의 안정적인 운전을 위하여 터빈 블레이드의 응력, 변형량 및 모드특성을 분석하고, 터빈 및 구조물의 설계변경을 통한 공진특성과 해결방안을 고찰하였다.

2. 풍력-태양광 복합 가로등

Fig. 1은 본 연구 대상인 풍력-태양광 복합 가로등을 나타낸다. 복합 가로등은 풍력터빈, 태양광 패널, 지지대, 제어(축전)장치 4부분으로 구성되며, 복합가로등 풍력발전기로는 200W 수직축 터빈을 대상으로 하였다. 터빈은 3개의 블레이드를 갖으며, 높이는

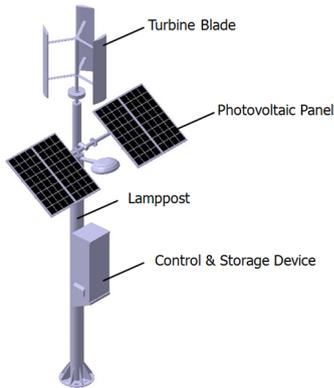


Fig. 1 Configuration of a hybrid street-lamp

Table 1 Property of materials

Material	Variable	Value
Structural steel	Compressible yield strength	280Mpa
	Tensile yield strength	310Mpa
Aluminum alloy	Compressible yield strength	250Mpa
	Tensile yield strength	250Mpa

1.22m이다. 태양광 패널의 크기는 가로 및 세로 각각 0.55m 및 1.1m이며, 지지대 직경은 0.216m이다.

풍력터빈은 50~180rpm 범위 내에서 작동되며, 알루미늄 합금으로 설계하였다. 터빈 블레이드 이외에는 모두 구조용 강관으로 설계하였으며, 각각의 물성치를 Table 1에 나타낸다.

3. 구조해석 및 경계조건

풍력-태양광 복합 가로등 구조특성을 평가하기 위하여 상용코드인 ANSYS Workbench Mechanical 12⁸⁾를 사용하였으며, 응력분포, 변형량 및 모드해석을 각각 수행하였다.

Fig. 2는 복합 가로등의 구조특성 연구를 위하여 생성된 격자를 나타낸다. 해석격자는 Hex Dominant 한 조건에서 부분적으로 Tetrahedrons 격자를 이용하는 복합형격자(hybrid mesh)로 구성하였으며, 사용된 Shell 격자는 약 20만 노드이다. 즉 터빈 블레이드 날개에는 정렬격자를, 그 외 부위에는 비정렬격자를 사용하였으며, 주요 부위의 확대도를 Fig. 2 (b), (c), (d)

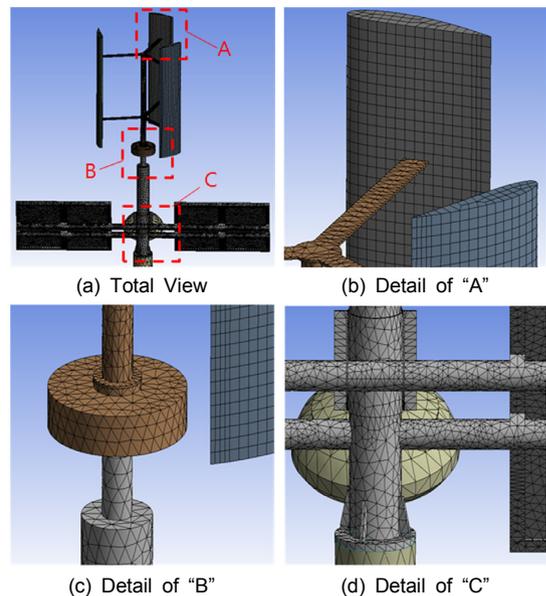


Fig. 2 Computational grid

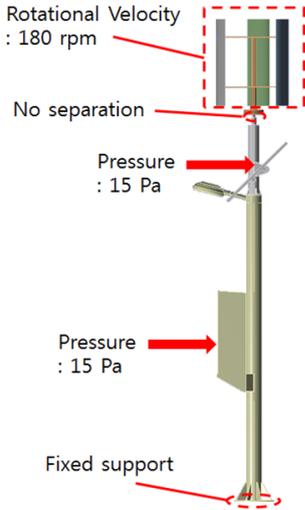


Fig. 3 Boundary conditions

에 나타난다.

Fig. 3은 구조해석에 사용된 경계조건을 나타낸다. 가로등 바닥면에 고정(fixed support) 조건을, 가로등과 터빈 블레이드의 회전부 경계조건으로 Non-separation 조건을 적용하였다. 가로등의 최대 변위를 고려하여 유동방향이 태양광 패널 및 제어장치 패널에 정면인 조건(Fig. 3)을 사용하였으며, 유속은 진동발생 조건인 5m/s를 적용하였다. 진동시작 속도는 낙동강 강변에 설치하여, 진동이 발생된 속도로 현장에서 측정하였다. 상대적으로 압력 영향이 작은 지지대와 회전관성이 지배적인 터빈 블레이드에 대해서는 압력조건을 고려하지 않았으며, 태양광 패널 및 제어장치 패널에 5m/s 유속의 동압에 해당하는 15Pa의 압력을 각각 적용하였다. 로터의 회전속도는 설계 최대 회전조건인 180rpm을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 변형량 및 응력해석

Fig. 4는 Fig. 3에서 제시한 경계조건을 적용한 복합 가로등 전체에 대한 변형량 및 등가응력 분포를

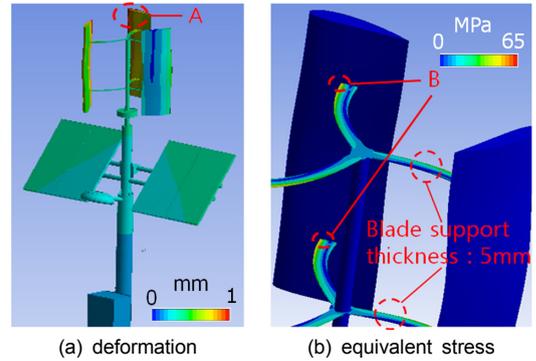


Fig. 4 Total deformation and equivalent stress

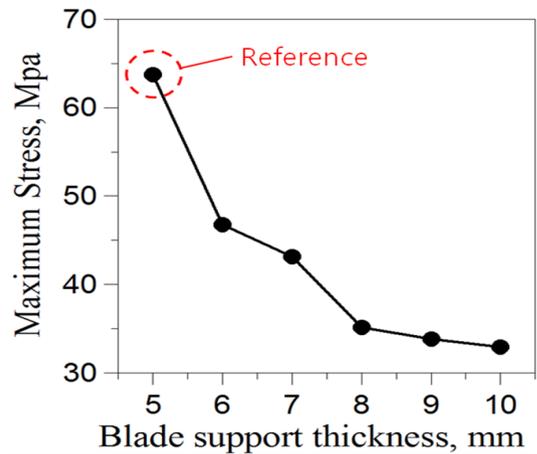


Fig. 5 Equivalent stress

나타낸다. 최대변위는 1mm 이며, 위치는 “A” 지점으로 터빈 블레이드 끝단에 위치한다. 터빈 블레이드 회전 관성력에 의해 발생하는 최대등가응력은 65 MPa로 Table 1의 항복인장강도 이내로 나타난다. 최대응력은 터빈 블레이드 지지부와 블레이드 연결지점인 “B” 지점에 위치한다. 응력의 집중도가 높은 날개 지지부의 특성에 따른 응력특성을 살펴보기 위하여 지지부의 기존 두께인 5mm를 10mm까지 증가시켜 가면서 계산한 결과를 Fig. 5에 나타낸다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 지지부의 두께가 두꺼워짐에 따라 지지부에 발생하는 최대응력이 감소하는 경향을 나타낸다. 특히 두께가 5mm에서 6mm로 변경 될 때 가장 큰 응력변화가 나타남을 알 수 있다.

4.2 터빈 블레이드 모드해석

소형풍력-태양광 복합 가로등에서 바람 특성에 따라 다양한 하중을 받는 터빈 블레이드의 진동이 지지대 구조물 진동과 연계하여 공진을 일으키기 쉽다. 먼저 터빈 블레이드 단독의 진동특성을 구조해석을 통하여 분석하였다.

Fig. 6은 터빈 블레이드의 구조해석용 경계조건으로, 터빈 블레이드 모듈의 하단부에 고정조건을 주었으며, 모드해석을 통하여 터빈 블레이드의 모드별 주파수와 변형패턴을 분석하였다.

Fig. 7은 터빈 블레이드 모듈해석 결과로, 1차~6차 모드에 대한 형상변형을 나타낸 것이다. 모드에 따라서 변형이 발생하는 부위가 다른 것을 확인할 수 있으며, 변형은 주로 블레이드 회전 지지대, 터빈 블레이드 지지대 및 터빈 블레이드 중심지지대에서 발생하였다. 이상의 결과를 바탕으로 3개 터빈 블레이드의 설계변수를 선정하였으며, 각각의 위치는 Fig. 8에 나타낸다.

그림에서 1, 2, 및 3은 날개 지지대, 날개 중심 지지대 및 블레이드 회전 지지대를 각각 나타낸다. 설계변수들은 기존형상 대비 25% 증가시켜 비교, 검토

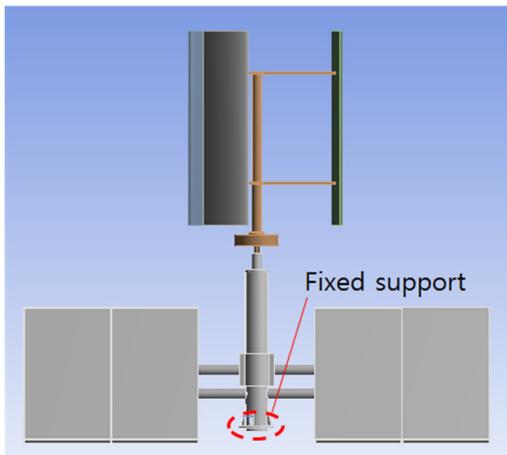


Fig. 6 Boundary condition for modal analysis on turbine blade

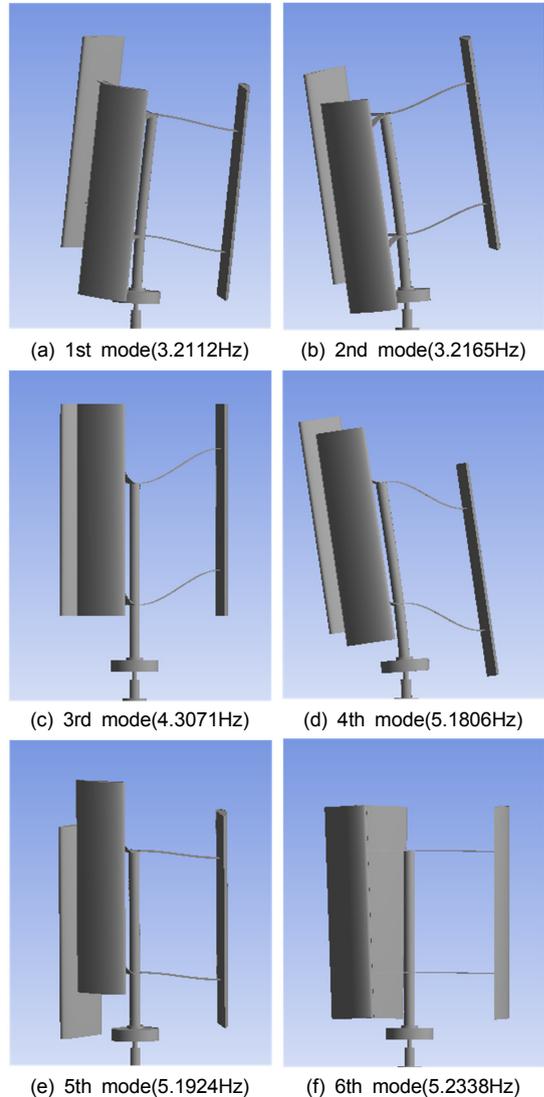


Fig. 7 Modal analysis on turbine blade

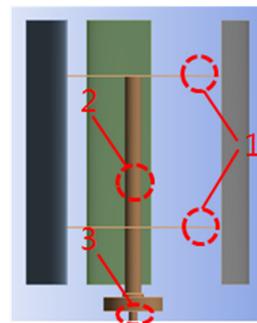


Fig. 8 Design variables on turbine blade

Table 2 1st natural frequency gap according to design variables (1st natural frequency for reference : 3.2112Hz)

Design Variable	Reference, mm	Modified (+ 25%), mm	Frequency Difference, Hz
Blade support thickness	5	6.25	+0.2222
Blade center diameter	60	75	+0.3209
Blade spindle diameter	30	37.	+0.2021
Consider all variable (1+2+3)	-	-	1.6693

하였다. 설계변수 형상변경에 따른 1차 주파수 차이를 Table 2에 나타내었으며, 블레이드 중심지름 변화가 1차 모드 주파수 차이에 가장 민감한 것으로 확인되었다. 모든 형상변수의 변경을 고려하였을 때, 1차 모드 주파수 차이는 1.6693Hz이다.

4.3 전체 구조물에 대한 Campbell diagram 해석

소형풍력터빈과 지지대가 연결되어 설치되어 있는 복합 가로동에서는 회전체인 터빈 회전수와 구조물의 진동수가 일치될 경우 공진(resonance)에 의한 큰 진동이 발생되기에 이에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 공진특성을 평가하기 위하여 지지대의 두께 등의 형상변경을 통하여 캠벨선도(Campbell diagram)로 분석하였다. 캠벨선도 해석은 종축을 진동수로 하고, 횡축을 회전체의 회전수로 하여, 회전체의 n 통과주파수(BPF, Blade Passing Frequency)와 전체 구조물의 고유진동수를 표기하여, 교차하는 지점의 임계속도(critical speed) 및 공진 주파수를 확인하는데 사용된다.

Table 3은 기존모델의 모드별 고유 진동수를 10차 모드까지 나타낸 것이며, 기존모델에 대한 캠벨선도를 Fig. 9에 나타낸다. 본 연구에서 사용된 터빈블레이드의 날개 수는 3개 이므로 3/rev의 기울기에 해당하는 1차함수의 n 통과주파수와 Table 3에 해당하는 10차 모드까지의 고유진동수를 x축에 평행한 직선으로 나타내었다. 전체 구조물의 고유진동수와 n

Table 3 Natural frequency for the reference model

Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1.	2.0465	6.	4.9955
2.	2.0607	7.	5.8023
3.	3.6003	8.	5.8424
4.	3.6102	9.	6.6877
5.	4.1755	10.	8.4342

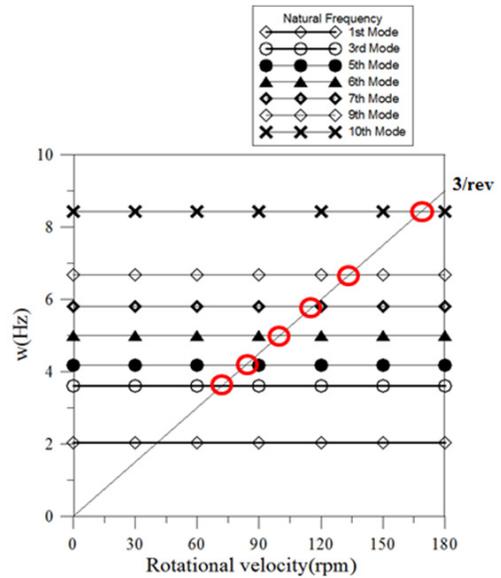


Fig. 9 Campbell diagram for the reference model

통과주파수(3/rev)가 만나는 지점은 회전속도가 낮아서 위험성이 낮은 1, 2차 모드를 제외하고도 6개로 전체 구조물이 터빈 블레이드와 공진될 수 있음을 알 수 있다. 캠벨선도에서 180rpm 이하에서의 공진점을 회피시키기 위해서는 저 주파수인 1, 2차 모드를 제외하고 3차 모드가 180rpm에서 9Hz 이상이 되는 주파수 특성을 갖는 것이 필요하다. 이를 위하여 추가로 구조해석을 수행하였으며, Fig. 8에 제시한 터빈 블레이드 설계변수 외에 추가적으로 3개의 변수를 선정하였으며 위치는 Fig. 10에 나타낸다. 추가적인 변수는 태양광 판넬 지지대, 2차 지지대 두께 및 주 지지대 두께로 설정하였다. 기존모델 치수 및 수정모델의 치수를 Table 4에 각각 나타낸다.

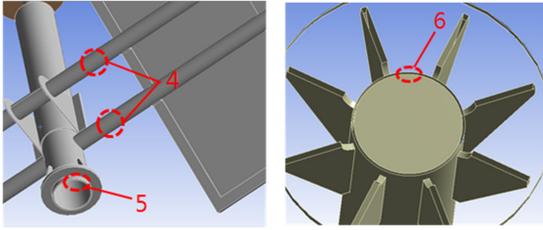


Fig. 10 Design variables

Table 4 Design variables for reference and modified model

Variable	Reference	Modified
Blade support thickness	5mm	15mm
2. Blade center diameter	60.5mm	75.5mm
3. Blade spindle diameter	30mm	70mm
4. Photovoltaic panel support diameter	60.5mm	65.5mm
5. Secondary pole thickness	4.85mm	14.85mm
6. Main pole thickness	4.5mm	19.5mm

Table 5 Natural frequency for the modified mode

Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1.	3.1189	6.	12.206
2.	3.1541	7.	13.422
3.	9.2038	8.	14.606
4.	10.648	9.	15.665
5.	10.845	10.	17.011

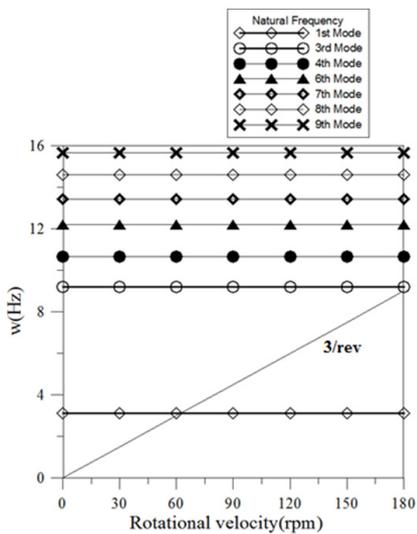


Fig. 11 Campbell diagram for the modified model

Table 5에 수정모델에 대한 모드별 고유진동수를 10차 모드 까지 나타낸다. 1, 2차 모드에서의 약 3.1 Hz 외에 3차 모드부터는 9 Hz이상의 고유진동수가 확인되었으며, 이는 Fig. 11의 수정모델에 대한 캠벨 선도에서 180rpm 이하의 공진주파수와 터빈 블레이드 의 통과주파수가 교차하는 지점이 없는 것을 확인할 수 있다.

이상의 연구를 통하여 재료 형상변수를 종합적으로 최적설계하면 터빈 블레이드와 지지 구조물간의 공진이 회피됨을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형풍력터빈-태양광 발전기 하이브리드 가로등을 대상으로 구조해석을 통한 구조물의 변형 및 응력특성을 평가하였으며, 풍력터빈과 지지 구조물간의 공진회피 설계를 위한 형상변수 변경으로 캠벨선도를 평가하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 터빈 블레이드의 회전력에 의해 블레이드 및 블레이드 지지부 연결지점에서 최대응력이 발생되며, 지지부의 두께가 20% 증가하면 응력이 30% 감소됨을 알 수 있었다.
- 2) 터빈 블레이드 설계 구조물인 블레이드 회전 지지대, 터빈 블레이드 지지대 및 터빈 블레이드 중심지지대의 형상을 25% 각각 증가시켜 본 결과, 터빈 블레이드 중심지를 변화가 1차 모드 주파수 변화에 가장 민감함을 알 수 있었다.
- 3) 기존 구조물 전체에 대하여 모드해석을 수행한 결과, 캠벨선도에서 터빈 블레이드의 회전수 구간별 공진 위험성이 확인되었으나, 설계 형상변수를 종합적으로 최적설계하면 터빈 블레이드와 지지 구조물간의 공진이 회피됨을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 한국건설기술연구원의 주요 개발사업 지원으로 수행되었습니다.

References

1. K. M. Dong, S. N. Chung, and C. Shin, "Performance Prediction and Structural Analysis of Counter Rotating Turbine Blades", Proceeding of Society of Korean Aeronautical and Space Science, 2001, pp. 708-711.
2. Y. D. Choi, S. W. Son, H. C. Jang, N. J. Choi, "Design and Structure Analysis of a Tower Service Lift for Offshore Wind Power System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.36, No.1, 2012, pp. 101-108.
3. J. H. Lee, Y. W. Lee, Y. D. Kim, Y. H. Choi, J. H. Jeong and K. Y. Park, "Design and Performance Evaluation of Small Wind Turbine for a Streetlight", Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol.10, No.1, 2006, pp. 119-125.
4. S. P. Lee, K. E. Kang, S. M. Chang and J. H. Lee, "Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment", Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.20, No.1, 2011, pp. 28-33.
5. W. S. Ko, H. W. Lee and N. G. Park, "Development of a vibration model of a helical gear pair for vehicle transmission", International Journal of Automotive Technology, Vol. 7, No.4, 2006, pp. 477-483.
6. H. H. Choo, J. P. Sim, M. W. Oh and D. H. Kim, "Operational Vibration Experiment and Analysis of a Small Vertical-Axis Wind Turbine Considering the Effect of a Tower Stiffness", Journal of the Korean Society for Fluid Machinery, Vol. 16, No. 3, 2013, pp. 05-10.
7. J. S. Kim, H. W. Lee, N. G. Park, Y. D. Kim, S. Y. Kim and D. H. Lee, "Characteristic of Vibration in Wind turbine System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No.6, 2011, pp. 786-795.
8. ANSYS-12 User Manual, 2009, Ansys inc.